

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Хань

Хань Цзэли

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ,
ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ПЛАВЛЕНИИ
ПРОВОЛОКИ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ОБРАБОТКАХ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

**Научный
руководитель:**

Клименов Василий Александрович

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор-консультант

**Научный
консультант:**

Чумаевский Андрей Валерьевич

доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

**Официальные
оппоненты:**

Потекаев Александр Иванович

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», профессор кафедры общей экспериментальной физики

Чинахов Дмитрий Анатольевич

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», декан факультета летательных аппаратов

Защита состоится «17» декабря 2025 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 4, аудитория 245.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС. ТПУ.03
доктор технических наук

 Гынгазов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Развитие и расширение применения аддитивных технологий с использованием металлов и высокоэнергетических источников энергии в виде лазерных и электронных лучей, плазменных и дуговых потоков является наиболее интенсивно развиваемым направлением при производстве уникальных изделий для высокотехнологичных производств и медицины. Связано это с тем, что аддитивные технологии позволяют решать проблему сокращения затрат посредством экономного использования материалов, сокращения производственного цикла и возможности проведения реверсивного инжиниринга в машиностроении и персонализированного изготовления объектов в медицине.

Вместе с тем существование таких проблем, как ограниченный выбор материалов, пригодных для печати в условиях воздействия концентрированных потоков энергии, сложности процессов плавления и затвердевания исходных сплавов в виде порошков, проволоки или стержней и, как результат, отклонение значений прочности от требований ГОСТов и стандартов, обусловленных особенностями состава и структуры материала, серьёзно сказывается на расширении применения и трудностях освоения аддитивных технологий.

Среди различных материалов, широко применяемых в аддитивных производствах, особое место занимают титановые сплавы, которые благодаря их высокой прочности, низкой плотности, превосходной коррозионной стойкости и хорошей биосовместимости, находят широкое применение, как в промышленности, так и в медицине. Хотя в аддитивных технологиях титановых сплавов наибольшее распространение получают лазерные источники энергии, применение электронно-лучевого плавления в вакууме имеет ряд преимуществ, связанных с исключением окисляемости титановых сплавов и реализации процессов с использованием проволоки, что значительно повышает производительность аддитивной технологии. Применение в качестве строительного материала коммерческой проволоки для сварки ВТбсв, существенно влияет на доступность такого фидстока и, самое главное, на эффективность процесса печати.

Титановые сплавы характеризуются фазовыми и структурными особенностями, которые определяют формирование их свойств при послойном наращивании. Хорошо известно, что образование неоднородной структуры, анизотропия и заниженные физико-механические свойства в формирующемся титановом сплаве типа Ti-Al-V в ходе послойного выращивания, что затрудняют достижение характеристики, устанавливаемых стандартами и техническими требованиями.

Вследствие этого, работа, направленная на выявление особенностей организации структуры и свойств титановых сплавов при электронно-лучевом проволочном аддитивном производстве, экспериментальное установление взаимосвязи между анизотропией структуры, механическими свойствами, деформацией и разрушением материала, и определение возможности управления структурно-фазовым состоянием материала последующими обработками является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

Несмотря на то, что применение электронных лучей при сварке и наплавке применялись в СССР и за рубежом ещё в 1980-е годы, создание оборудования для аддитивных технологий (АТ) началось в начале 2000-х годов. При этом следует обратить внимание, что именно электроннолучевые технологии продемонстрировали возможность эффективного применения проволоки в качестве строительного материала. В целом можно отметить, что вопросам развития аддитивных технологий с применением металлов посвящены работы научных коллективов Григорьянца А.Г., Туричина Г.А., Трушниковой Д.Н., Коновалова С.В., Колчанова Д.С., Драгунова В.К., Панина В.Е., Колубаева Е.А., Лидера А.М., Шаркеева Ю.П., Балахонова Р.Р. Кривоносовой Е. А. и др., а также зарубежных учёных Collings, E. W., Welgovski, M. St., Zhang, Y., DebRoy, T., Murr, L. E., Edwards, P., Liu, Z., Qu X, Zhang, Z. Fu, Y. Специализированное оборудование для аддитивных

технологий для печати проволокой начало создаваться в последнее десятилетие в Национальном исследовательском университете «МЭИ», Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ), Национальном исследовательском Томском политехническом университете (НИ ТПУ) и Институте прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН). В ИФПМ СО РАН на разработанных установках для аддитивных технологий с применением проволоки проводятся работы по использованию различных материалов и их синтезу *in situ*, а также, изготовление из них реальных промышленных объектов. Исследования проводятся в научных коллективах Колубаева Е.А., Панина А.В., Тарасова С.Ю., Астафуровой Е.Г. и др. Возможности созданного оборудования и разрабатываемые технологии электронно-лучевой печати позволяют и изготавливать изделия из титановых и других сплавов в интересах промышленности и медицины. Особо следует отметить и появление в последние годы промышленного электроннолучевого оборудования для печати проволокой создаваемого ООО «НПК ТЭТА» и ООО «Русатом – Аддитивные технологии».

В целом можно констатировать, что наибольшее внимание привлекается к изготовлению изделий из титановых сплавов с помощью лазерной и электронно-лучевой порошковых технологий аддитивного производства, при этом накоплен большой объём данных доступный для изучения влияния параметров процессов печати и последующих упрочняющих обработок на структурно-фазовое состояние и свойства формирующихся при печати сплавов.

В тоже время, как показывают исследования, изучение особенностей формирования структуры и свойств титановых сплавов, формирующихся при плавлении сварочной титановой проволоки ВТ6св электронным лучом в условиях высокопроизводительных АТ, изучено в меньшей степени, что затрудняет установление взаимосвязи между составом, структурными неоднородностями и геометрической анизотропией сплавов, и физико-механическими свойствами, а также процессами деформации и разрушения. А это, в свою очередь, осложняет выявление ключевых параметров среди множества возможных параметров энергетического воздействия при технологических процессах печати и последующих обработок, существенно влияющих на структуру формирующегося сплава системы Ti-Al-V при плавлении проволоки ВТ6св, определяющую прочность и пластичность исследуемого сплава, а значит и сказывающихся на их поведение при различных видах нагружения или последующих упрочняющих обработках. Отсутствие базы данных по прочностным свойствам титановых сплавов, сформировавшихся при электронно-лучевой печати, в широком диапазоне температур не позволяет назначать термические режимы при печати и выбирать наиболее оптимальные режимы при последующих упрочняющих обработках.

Целью диссертационной работы является выявление особенностей организации структуры и формирования свойств титановых сплавов при электронно-лучевом проволоочном аддитивном производстве, установление взаимосвязи между анизотропией структуры, механическими свойствами, деформацией и разрушением титанового сплава и определение возможности управления его структурно-фазовым состоянием методами термической и пучковой обработок.

Идея работы заключается в том, что для выявления особенностей организации структуры и свойств титановых сплавов при электронно-лучевом плавлении проволоки в условиях АП использовать экспериментальные методы исследования воздействия концентрированных потоков энергии на титановые сплавы и методы изучения их свойств при формировании различных объектов.

Для достижения поставленной цели, в диссертации сформулированы и решены взаимосвязанные **задачи**:

1. Определить влияние условий сплавления проволоки ВТ6св при построении тонкостенных объектов на структуру и физико-механические свойства образующегося сплава.

Провести сравнение установленных характеристик с характеристиками титановых сплавов системы Ti-Al-V, полученных традиционными методами и альтернативными аддитивными технологиями.

2. Установить влияние структурной неоднородности и геометрической анизотропии сформированного при печати объекта системы Ti-Al-V на прочностные свойства, характер развития пластической деформации и разрушение при растяжении и сжатии.

3. Экспериментально исследовать структурно-фазовое состояние и механические свойства титанового сплава, сформировавшегося при печати объектов сложной геометрической формы с последующими термической и пучковой обработками, с оценкой механизмов деформации и разрушения.

4. На основе исследований сплавов, сформировавшихся при электронно-лучевой печати, обработанных в широком диапазоне режимов термической обработки, сформировать базу исходных данных для расчёта прочности на растяжение и относительного удлинения при разрыве материала, полученного аддитивным способом из проволоки ВТ6св для прогнозирования его свойств после термообработки.

Научная новизна исследования

1. Экспериментально исследованы особенности формирования структуры на различных масштабных уровнях и их влияния на упругие и прочностные свойства титанового сплава системы Ti-Al-V, образующегося в условиях электронно-лучевого воздействия мощностью 1-2 кВт при послойном плавлении проволоки.

2. Установлено влияние анизотропии свойств и структурной неоднородности сплава системы Ti-Al-V на механизмы его деформации и разрушения, применяя лазерные методы корреляции изображений при деформации образцов, полученных с помощью электронно-лучевой печати проволокой.

3. Показана возможность регулирования пластичности и прочностных свойств титанового сплава системы Ti-Al-V за счет увеличения содержания α - или β -фазы на основе установленных зависимостей режимов термической обработки в широком диапазоне температур при различных способах электронно-лучевой печати объектов.

Теоретическая и практическая значимость работы

– На основе анализа структуры и свойств титановых сплавов, формирующихся при различных методах аддитивных технологий, установлены особенности формирования неоднородной структуры и анизотропии свойств титановых сплавов при сплавлении электронным лучом сварочной проволоки ВТ6св.

– В работе получены экспериментальные данные по влиянию режимов термообработки на структуру, фазовый состав и механические свойства сплава ВТ6св. Полученный результат способствует расширению технологической базы данных по проволочному электронно-лучевому аддитивному производству изделий из сплава ВТ6св и внедрению данной технологии в промышленное изготовление деталей.

– Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в Отделении материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета совместно с Шэньянским политехническим университетом по образовательной дисциплине «Технологии модифицирования поверхности и нанесения покрытий» для бакалавров по направлению 15.01.00 Материаловедение и технологии материалов.

– В рамках созданного учебного плана по программе повышения квалификации «Электронно-лучевая 3D-печать» разработан модуль по термической обработке изделий из титанового сплава из сварочной проволоки ВТ6св.

– Результаты работы внедрены в виде технологических рекомендаций по внедрению аддитивных технологий при производстве медицинских изделий в компании ООО «Инженер центр».

– По результатам диссертационной работы было получено свидетельство о государственной регистрации базы данных, созданной для расчёта характеристик титанового сплава и возможности выбора наиболее подходящего метода термической обработки.

Методология и методы исследования

Методология диссертационной работы основана на том, что состав применяемой титановой сварочной проволоки, энергетические параметры электронного луча и геометрические характеристики формируемых при сплавлении объектов определяют структурно-фазовое состояние титанового сплава, которое обуславливает его физико-механические свойства. Исходя из этого, в работе были рассмотрены различные термические условия при формировании различных по форме и размерам объектов аддитивного производства с использованием электронно-лучевого вакуумного оборудования ИФПМ СО РАН. Исследование структурно-фазового состояния осуществлялось с использованием комплекса современных методов: рентгеновской компьютерной томографии, оптической и электронной микроскопии, рентгено-флуоресцентного и рентгено-структурного анализов. В части исследования физико-механических свойств образующегося сплава для определения модуля упругости и твёрдости использовались различные методы индентирования и ультразвука; для исследования влияния структурных особенностей титанового сплава на характер деформации и разрушения при растяжении и сжатии использовалась лазерная оптическая система VIC-3D. Возможность совершенствования структуры и свойств титановых сплавов при печати проволокой изучалась при последующих термических обработках в широком диапазоне температур и времени обработки, а также при поверхностной импульсной ионно-пучковой обработке с помощью ионного ускорителя НИ ТПУ. Экспериментальные исследования с применением методов физического материаловедения проводились на базе Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» НИ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710 и Центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ).

Положения, выносимые на защиту

1. При аддитивном электронно-лучевом способе печати проволокой сплава системы Ti-Al-V с регулируемой мощностью пучка в диапазоне 1–2 кВт кристаллизация металла в поле теплового градиента приводит к формированию направленной структуры из первичных столбчатых зерен β -фазы, вытянутых в направлении отвода тепла и претерпевающих α - β превращение при охлаждении с образованием структуры с преобладанием пластин α -фазы, измельченных на границах между исходными зёрнами β -фазы.

2. Неоднородность структуры сплава системы Ti-Al-V, формирующегося при послойном электронно-лучевом плавлении проволоки ВТбсв обуславливает различные механические свойства в направлении печати и направлении выращивания (модуль упругости, твёрдость и предел прочности различаются в диапазоне от 1,1 до 1,3 раза) и специфический механизм деформационного поведения и разрушения при растяжении и сжатии, обусловленный ролью границ исходной β -фазы.

3. В аддитивно-полученном сплаве системы Ti-Al-V увеличение длительности отжига в интервале температур от 350 °С до 850 °С приводит к увеличению пластичности в результате повышения содержания α -фазы, а в интервале температур от 950 °С до 1050 °С приводит к повышению предела прочности и предела текучести за счет повышения содержания β -фазы.

Степень достоверности полученных результатов определялась использованием современных аналитических методов исследования структуры материалов и оценки их свойств, воспроизводимостью экспериментальных данных, статистической обработкой результатов измерений, соответствием результатов исследований данным, полученным другими специалистами.

Апробация работы

Результаты работы представлены и обсуждены на следующих семинарах и конференциях: XIV Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения СПМ» (г. Томск, 2021); XIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов и учащейся молодежи «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении» (г. Юрга, 2022); II Международная научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов» (г. Томск, 2022); Международная конференция «Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения» (г. Томск, 2022); Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (г. Томск, 2022); XXIII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество». «Металлургия – 2022» (г. Новокузнецк, 2022); III Международная научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов» (г. Томск, 2023); XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2023); Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (г. Томск, 2023); XIV Китайско-Российско-Белорусский симпозиум «Перспективные плазменные технологии 2023» (г. Томск, 2023); Материалы II–V всероссийских школ и конференций «Аддитивные технологии: металлы, композиты и биоматериалы» (г. Москва, 2024); Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии «Физическая мезомеханика» (г. Томск, 2024); 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects «EFRE-2024» (г. Томск, 2024); Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (г. Томск, 2024); XIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (г. Томск, 2024).

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором или в соавторстве с другими сотрудниками при его непосредственном участии. Диссертантом поставлена цель работы, сформулированы задачи, основные положения и выводы. Вклад Хань Цзэли заключался в проведении структурных исследований, измерении физико-механических свойств и проведении механических испытаний, оценке комплекса свойств материалов, обсуждении полученных данных, разработке рекомендаций по практическому применению результатов исследований, подготовке публикаций и материалов заявки на базу данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ПИШ НИР – 2024-016 Минобрнауки России Национального исследовательского Томского политехнического института.

Публикации

Результаты исследований опубликованы в 17 научных публикациях, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК; 2 статьи, в рецензируемых зарубежных издательствах индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science; 12 публикаций в материалах научных конференций различного уровня, входящих в РИНЦ.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационное исследование по своим целям, задачам, методам исследования, содержанию и научной новизне соответствует следующим пунктам Паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки): П3. Экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ. П4. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами. П6. Установление закономерностей влияния технологии получения и обработки материалов на их структуру, механические, химические и физические свойства, а также технологические свойства изделий, предназначенных для использования в различных областях промышленности и медицины П7. Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, выводов, списка литературы из 165 наименований и 5 приложений. Общий объём диссертации составляет 172 страницы, включая 64 рисунка и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, перечислены полученные в работе результаты, показана их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность и обоснованность, представлены методология и методы исследований, показана апробация результатов работы, личный вклад соискателя, охарактеризованы структура и объём диссертации.

Первая глава работы посвящена анализу современного состояния и основным научным и технологическим проблемам формирования структуры и свойств титановых сплавов, образующихся в условиях аддитивных производств. Рассмотрены публикации российских и зарубежных ученых о методах 3D печати металлами, характеристиках лазерного и электронно-лучевого сплавления металлов и применении титановых сплавов в медицине. На основе анализа исследований показано как особенности процессов взаимодействия высокоэнергетических воздействий сказываются на особенностях структуры, состава и свойств титановых сплавов, формирующихся при сплавлении титановых фидстоков, в том числе и в виде проволоки. Проведён сравнительный анализ различных методов дополнительных обработок и их влияние на структуру и свойства напечатанных проволокой титановых сплавов. Сформулированы цели и задачи исследований.

Во второй главе «Материалы, методы формирования объектов и методы исследования их структуры и свойств» описаны материалы, выбранные в исследовательской работе, оборудование, на котором изготавливались путём послойного сплавления объекты из титановых сплавов при различных условиях, приборы для неразрушающего контроля и представлен комплекс аналитического и испытательного оборудования. Сравнение структуры и свойств титанового сплава, формирующегося после послойного плавления проволоки ВТ6св электронным лучом разной мощности, осуществлялось с титановыми сплавами типа ВТ1-0, ВТ6 и Ti6Al4V полученными традиционными технологиями (литьё, прокат и ковка). Представленные методы структурных и фазовых исследований позволили проводить комплексные исследования в широком диапазоне масштабных уровней с проведением макро- и микроиндентирования и микроскопии вплоть до тонкой структуры. Механические испытания при растяжении с оценкой поведения деформации методом корреляции изображений с помощью системы VIC-3D давали возможность оценивать влияние неоднородности состава и структуры титанового сплава на характер развития деформации и его разрушение.

В третьей главе представлены результаты исследования структурно-фазового состояния и свойств титанового сплава, формирующегося при послойном плавлении проволоки ВТ6св электронным лучом на водоохлаждаемом столе и подложке из сплава ВТ1-0, с регулируемой мощностью воздействия путём уменьшения тока пучка в диапазоне от 55 мА до 40 мА, рисунок 1.

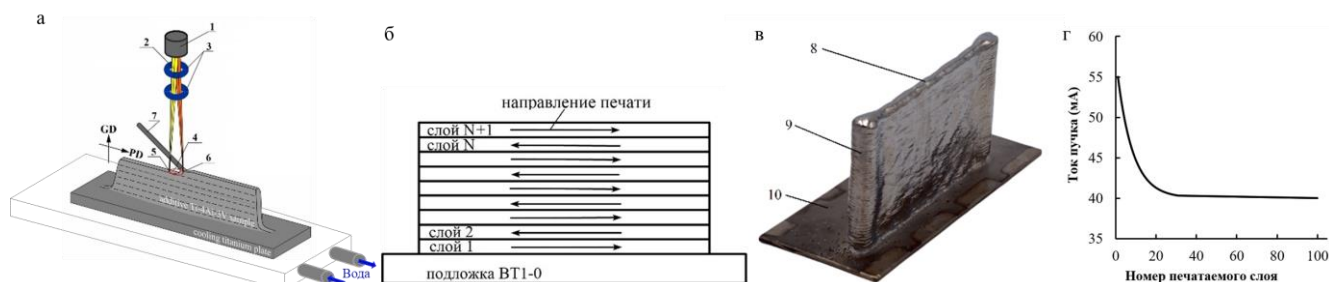


Рисунок 1 – Принципиальная схема наплавки проволоки (а), схема печати (б) и вид напечатанной пластины (в) 1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – система магнитной фокусировки; 4 – развертка пучка; 5 – положение пучка для оплавления подложки; 6 – положение пучка для плавления проволоки; 7 – проволока; 8 – стенка образца; 9 – зона разворота луча, 10 – подложка, ток пучка при печати (г)

Изучая макро- и микроструктуру напечатанного образца, установлено, что в процессе электронно-лучевой аддитивной печати с подачей проволоки, когда толщина расплавленного слоя значительно больше, чем в SLM, термические условия соответствуют гораздо более низким скоростям охлаждения, что подтверждается формированием столбчатых зерен вытянутых вдоль направления выращивания, внутри исходных зерен наблюдается формирование пластинчатых α - и β -фаз (рисунок 2). Эта структура состоит из зерен полигонального вида в поперечном сечении, размером от 1,0 до 2,0 мм в плоскости сканирования. В продольном сечении зерна представлены вытянутой столбчатой формой.

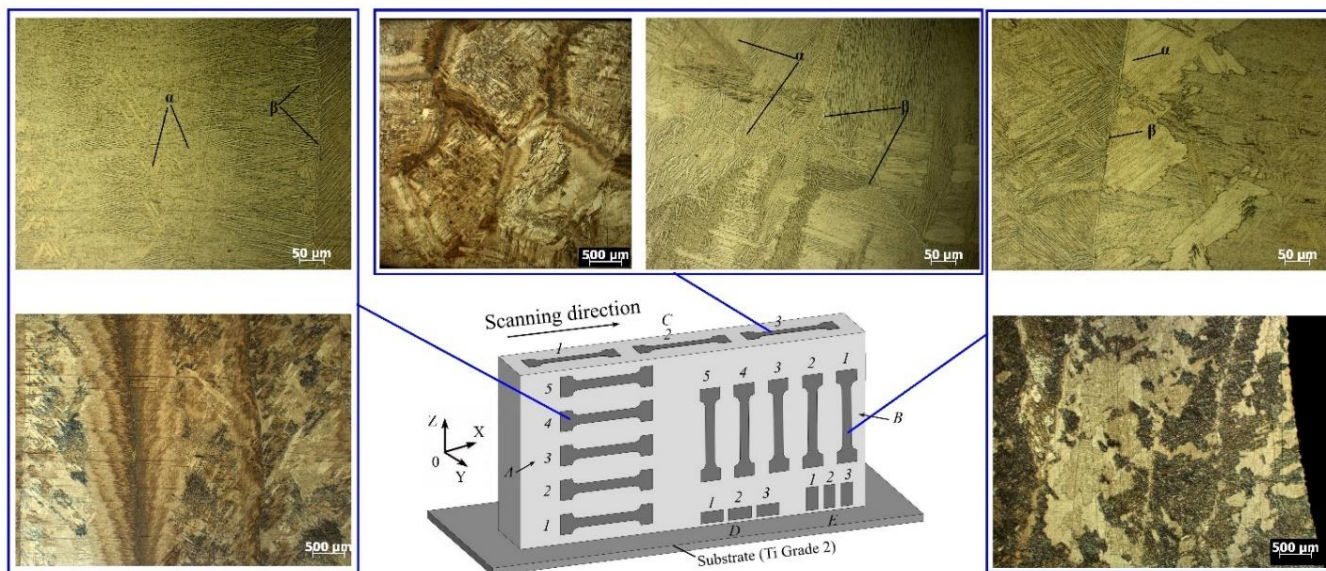


Рисунок 2 – Макро- и микроструктура напечатанных образцов сплава ВТ6св с крупными столбчатыми зёрнами

При исследовании с применением EBSD-анализа установлено, что для образцов в целом не характерно образования выраженной кристаллографической текстуры (рисунок 3). Это обусловлено прохождением полиморфных превращений при охлаждении образца с образованием структуры корзиночного плетения из пластин α - и β -фазы между ними. В структуре первичных β -зерен выделяется структура из достаточно крупных пластин α -фазы. На границах первичных β -зерен отмечается измельчение пластинок (№1 на рисунке 3). Это обусловлено механизмом распада β -зерен с ростом пластинок α -фазы от границы исходного β -зерна. Так как граница является

некоторым аналогом концентратора для роста пластин, что также видно по ряду граничных образований (№2 на рисунке 3), вблизи неё находятся значительно меньшие по размеру пластинки, укрупняющиеся внутри зерна. Внутри зерна также отмечается наличие областей с меньшим размером пластин (№3 на рисунке 3), что может быть обусловлено близостью к границам соседних зерен в данной области.

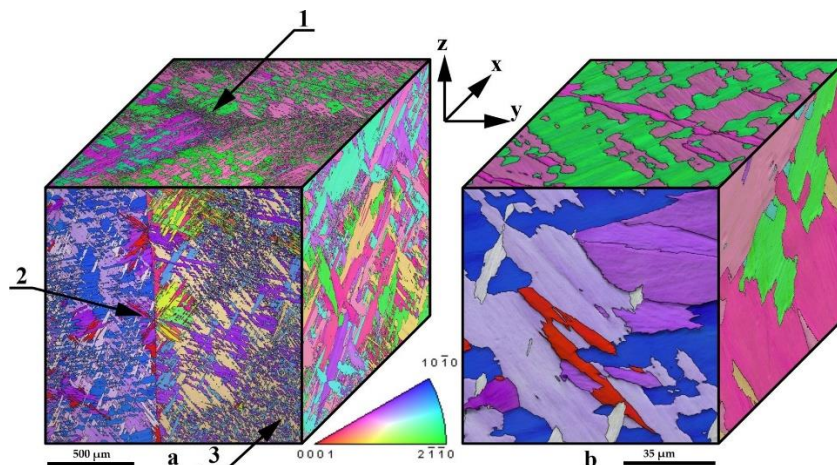


Рисунок 3 – Карты дифракции обратнo-рассеянных электронов (EBSD)

Исследование с помощью ТЕМ показывает, что зерна имеют крупные размеры, а их внутренняя структура находится в вытянутом состоянии, направление которого зависит от направления теплопроводности, также обнаружено, что плотность дислокаций внутри материала невысокая (рисунок 4 а, в), так как напечатанное изделие не подвергалось деформационной обработке и представляет собой кристаллическую структуру, сформированную практически непосредственно из расплавленного состояния. Анализ картин электронной дифракции показывает, что фазовый состав материала представлен пластинчатыми α - и β -фазами (рисунок 4 б, г).

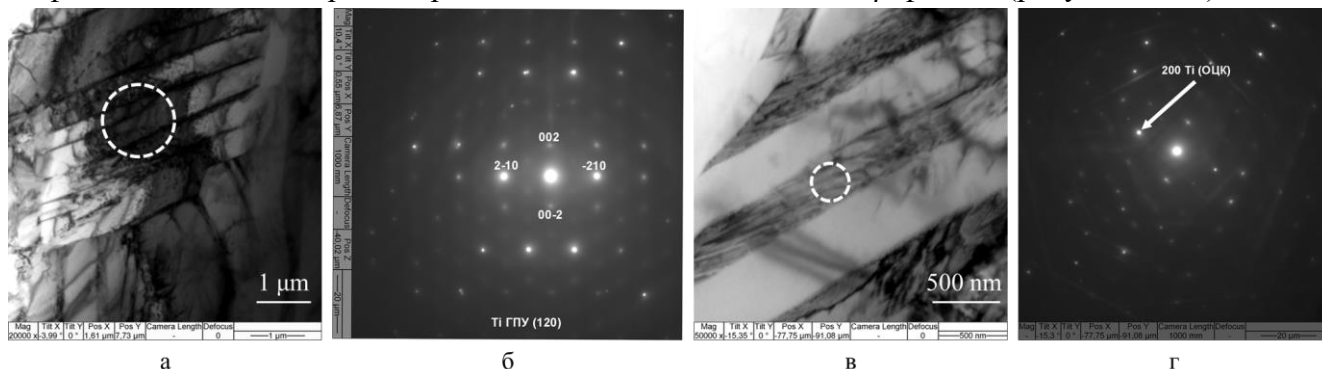


Рисунок 4 – Светлопольное ПЭМ-изображение микроструктуры 3D-напечатанного образца сплава системы Ti-Al-V (а, в), микроэлектроннограммы α -фазы (б) и β -фазы (г)

Известно, что ориентация зёрен в поликристаллическом металле распределена случайным образом, его совокупный модуль упругости должен проявляться как изотропный, то есть его значение практически одинаково во всех направлениях. Однако в данном эксперименте, исходя из анализа данных модулей упругости в трёх направлениях (см. таблицу 1), несмотря на поликристаллическую природу материала, в некоторых направлениях наблюдаются существенные различия. Это объясняется тем, что в процессе аддитивного производства материал подвергается специфической тепловой истории, что приводит к направленному росту зерен вдоль определённых направлений. В результате плотные плоскости демонстрируют различную атомную плотность в зависимости от направления, что приводит к расхождениям в значениях модуля упругости и, следовательно, к проявлению анизотропии.

Таблица 1 – Модуль упругости напечатанного изделия при разном направлении деформации

	Группа А	Группа В	Группа С
Модуль упругости, ГПа	107±2,2	103,4±5,1	93,7±2,1

Следует отметить, что исследуемый сплав преимущественно имеет структуру с шестиугольной плотноупакованной решёткой, при которой распределение атомной плотности определяется следующим порядком: направление $\langle 2-1-10 \rangle$ характеризуется более высокой плотностью, чем направление $\langle 0001 \rangle$, которое, в свою очередь, превосходит направление $\langle 10-10 \rangle$, как показано на изображении EBSD (рисунок 3). Рисунки 5 а, 5 б и 5 в показывают кривые «напряжение-деформация» относительно площади поперечного сечения образцов при одноосном растяжении в координатах « $\sigma_{\text{eng}}-\varepsilon_{\text{eng}}$ ». Результаты обобщены в таблице 2. Рисунок 5 а показывает, что кривые А-3, А-4, А-5 (для образцов, вырезанных вдали от подложки) совпадают друг с другом. Кривая А-1 (для образца, вырезанного вблизи подложки) не совпадает с другими кривыми. Сопротивление разрыву образцов, вырезанных вблизи боковой стороны пластины, выше, чем у образцов, вырезанных из центра пластины. На рисунке 5 в можно увидеть типичную кривую поведения образца при растяжении. Значения механических свойств образцов группы С относительно близки. По результатам испытания на сжатие наблюдается явное различие, предел прочности у группы Е в 1,25 раза больше, чем у группы D, а относительное удлинение при сжатии в 1,8 раза больше.

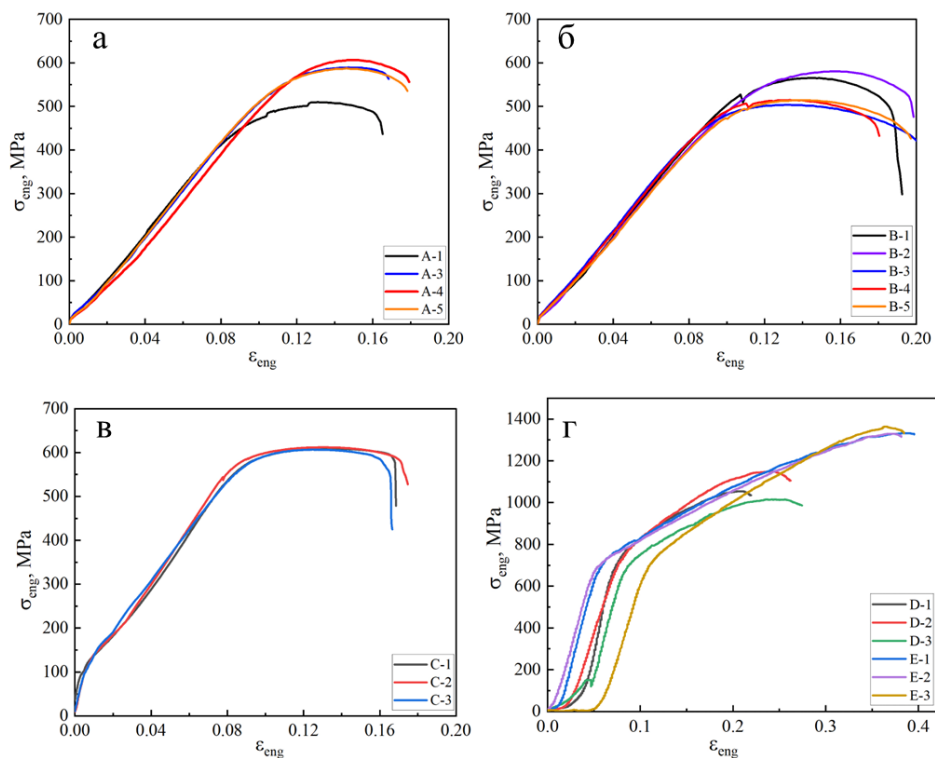


Рисунок 5 – Инженерные кривые напряжение-деформация (а – горизонтальное; б – вертикальное; в – в плоскости печати) и сжатия (г): D – горизонтальное; Е – вертикальное) в различных направлениях относительно направления печати

С применением цифровой оптической системы VIC-3D в экспериментах по одноосному растяжению получено распределение поля напряжений для идентификации процессов деформации в зависимости от деформации растяжения пластины. На рисунке 6 чётко прослеживается процесс деформации образца вдоль оси растяжения. Структура с крупными столбчатыми зёрнами, вытянутыми вдоль направления выращивания, обеспечивает различное строение для экспериментальных образцов (см. рисунок 7а, 7б). В образцах группы А крупные столбчатые зёрна располагаются перпендикулярно оси растяжения. В образцах группы В эта ось совпадает с направлением роста и, следовательно, с направлением роста зёрен. В группе С ось растяжения

перпендикулярна росту зерен, но в отличие от группы А, плоскость образца перпендикулярна направлению роста зерен. Как отмечалось выше, группа В характеризуется более высокой пластичностью, чем группы А и С. Последние характеризуются различной поверхностью разрушения при близких значениях предела прочности при растяжении, предела текучести и относительного удлинения при разрыве.

Таблица 2 – Параметры образцов титанового сплава после испытаний на прочность при растяжении

Образец	Предел прочности при растяжении, σ , МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Группа А	573 $\pm$ 43	8.0 $\pm$ 0,8
Группа В	536 $\pm$ 34	11.8 $\pm$ 1,5
Группа С	609 $\pm$ 3	8.0 $\pm$ 0,1
	Предел прочности при сжатии, σ , МПа	Пластичность при сжатии, %
Группа D	1073 $\pm$ 70	16 $\pm$ 1
Группа E	1342 $\pm$ 19	29 $\pm$ 4

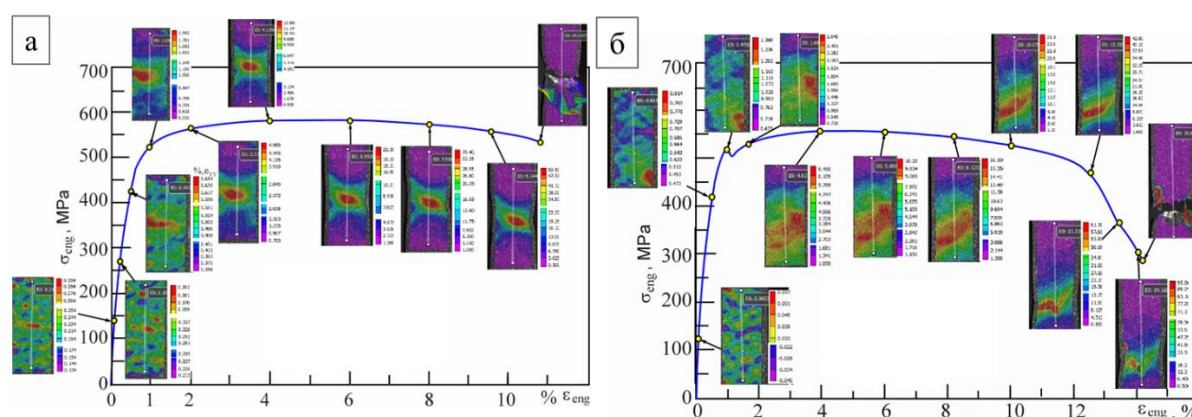


Рисунок 6 – Кривая деформации растяжения для образца, вырезанного из центра пластины (группа А) параллельно направлению печати (а) и (группа В) перпендикулярно направлению печати (б), и распределение поля продольной деформации ϵ_{yy} в соответствующих точках

Пластическая деформация и разрушение образцов с исходной крупнозернистой структурой в основном происходят посредством дислокационной ползучести. Об этом свидетельствует преимущественно вязкое разрушение с небольшим количеством квазихрупкого разрушения. В случае ориентации роста зерен можно предположить, что движение дислокаций встречает меньше барьеров, чем при испытании образцов, перпендикулярных направлению роста зерен (см. рисунок 7в). Это обеспечивает более высокую пластичность для данных образцов. В отличие от однофазных материалов с барьерами в виде границ зерен, более высокая пластичность, вероятно, связана с плотностью межфазных границ вблизи исходных границ β -фазы (рисунок 3а, №1, рисунок 7е), а не в объеме материала.

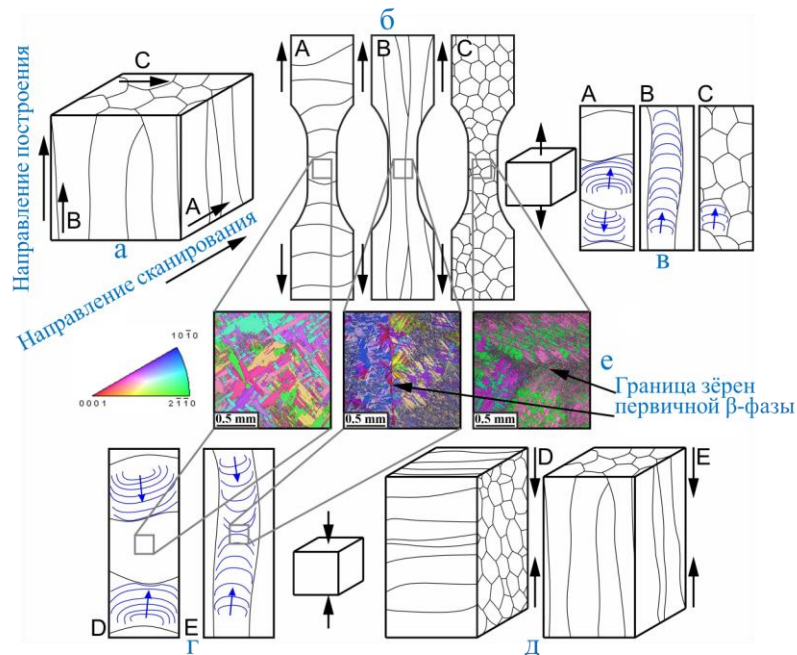


Рисунок 7 – Схематическая иллюстрация взаимосвязи деформации и разрушения образцов при растяжении и сжатии: (а) структура после печати; (б) структура образцов в форме «двойной лопатки» после растяжения; (в) дислокационная ползучесть при растяжении; (г) структура образцов в форме «двойной лопатки» после сжатия; (д) дислокационная ползучесть при сжатии; (е) EBSD-карты поперечных сечений образцов

В группе А существуют барьеры для движения дислокаций, но их выход на боковые поверхности образцов не затруднен. В группе С такие барьеры присутствуют в виде границ зерен, но существуют стесненные условия для выхода дислокаций на боковые поверхности. Во время испытаний на прочность при растяжении это не столь важно, однако может привести к механизмам разрушения, выявленным ранее. При одноосном сжатии структура приобретает столбчатые зерна с различной ориентацией относительно оси деформации, как показано на рисунке 7 г. Как отмечалось выше, механические свойства в этом случае выше, чем у образцов после растяжения. Образцы, ориентированные вдоль направления роста зерен, демонстрируют более высокую пластичность и прочность.

В целом, барьеры для движения дислокаций в виде границ зерен наблюдаются для образцов, подвергнутых как сжатию, так и растяжению. Однако стесненные условия важны при сжатии, поскольку они создают условия для захвата дислокаций, движущихся навстречу друг другу, как показано на рисунке 7 д. Во время деформации образца в направлении печати барьерный эффект, предположительно, незначителен при приближении дислокаций, в то время как во время деформации в направлении роста он оказывает существенное влияние на процессы деформации и разрушения в вертикальных столбчатых зернах. Можно также предположить, что этот факт может привести к более высокой устойчивости образцов к деформации изгиба. В этом случае рост основной трещины происходит поперек направления роста зерен и осложняется барьерами в виде границ первичных зерен.

В четвертой главе экспериментально исследованы структурно-фазовое состояние и механические свойства титанового сплава, сформированного при печати объектов сложной геометрической формы с последующими термической и пучковой обработками, а также с оценкой механизмов деформации и разрушения. В качестве материала для получения образцов использовалась сварочная проволока сплава ВТ6св диаметром 1,6 мм методом электронно-лучевого аддитивного производства. Размер образцов в виде полусферы составлял до 400 мм по диаметру, с толщиной стенки до 8 мм. Ток пучка постепенно повышается с 50 до 100 мА, термическое условие

при печати представлено на рисунке 8 а. На рисунке 8 представлены макроструктура и микроструктура крупного объекта, изготовленного из сплава ВТ6св. Микроструктура характеризуется наличием границ зерен, унаследованных от крупных столбчатых первичных зерен β -Ti, с их длинными осями, ориентированными вдоль направления отвода тепла (рисунок 8 б). Также стоит отметить, что образцы не содержали каких-либо дефектов, вызванных аддитивным процессом, таких как, например, сферические поры или трещины. Внутри границ первичных зерен β -титана наблюдались типичные литые микроструктуры, состоящие из: зернограничного α -титана, крупных колоний пластин α/β -фазы, упорядоченных мелкодисперсных колоний α/β с "корзиночным" переплетением, которые формировались внутри бывших β -зерен (рисунок 8 в).

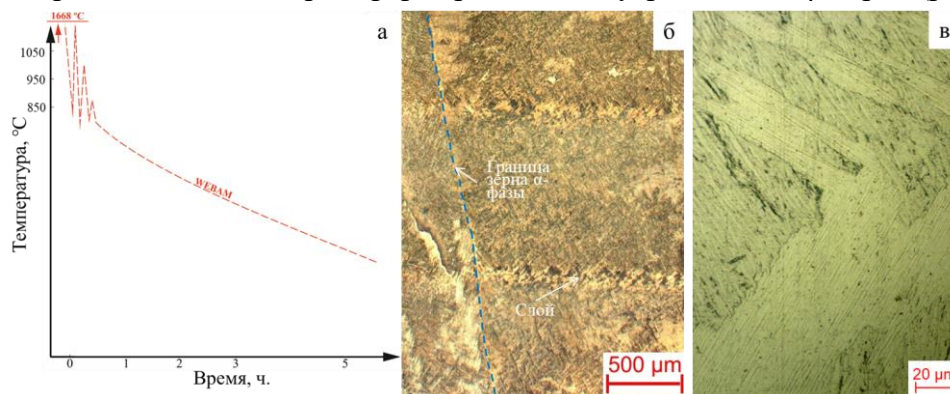


Рисунок 8 – Термическая условия печати (а); макроструктура (б) и микроструктура (в) крупного объекта, напечатанного сплава из проволоки ВТ6св

Образцы для термообработки (ТО) были подготовлены из напечатанного реального объекта в виде лопаток для последующих испытаний, в соответствии с ГОСТом 1497-84 на растяжение. Термическая обработка для образцов после печати выполнялась в муфельных печах в диапазоне температур от 350 °С до 1050 °С, Охлаждение проводилось на воздухе. Режимы ТО представлены в таблице 3. После термообработки вырезали образцы на растяжение с размером рабочей части 2х3х18 мм, для каждого режима ТО 3 образца.

Таблица 3 – Режимы термической обработки образцов сплава ВТ6св после ЭЛАП

№	Температура, °С	Время выдержки, ч.	Тип охлаждения
1	350	1	на воздухе
2	450	1	на воздухе
3	550	1	на воздухе
4	650	1	на воздухе
5	750	1	на воздухе
6	850	1, 2, 3, 5	на воздухе
7	950	1, 2, 3, 5	на воздухе
8	1050	1, 2, 3, 5	на воздухе

Механические свойства всех термически обработанных образцов представлены на рисунке 9. Из графика видно, что с повышением температуры термообработки прочность материала в целом возрастает. При температуре ниже 850 °С увеличение прочности выражено слабо, однако наблюдается значительное улучшение пластичности. При температуре 950 °С как прочность, так и пластичность возрастают с увеличением времени выдержки. В то же время, при температуре 1050 °С прочность продолжает расти с увеличением времени выдержки, тогда как пластичность, наоборот, снижается. Так как при печати материал при температурах ниже полиморфного превращения находится достаточно длительное время, выдержка при данной температуре приводит к образованию достаточно близкой структуры материала с близкими механическими свойствами и свойства образцов реализуются соответственно сформированной структуре напечатанного состояния. Образцы четко разделяются на 3 основных группы. Для термической обработки до 850

°C происходит увеличение пластичности материала без увеличения прочности. Причем при увеличении длительности выдержки при отжиге пластичность возрастает. Это связано со значительным снижением доли прочной β -фазы и увеличением доли пластичной α -фазы.

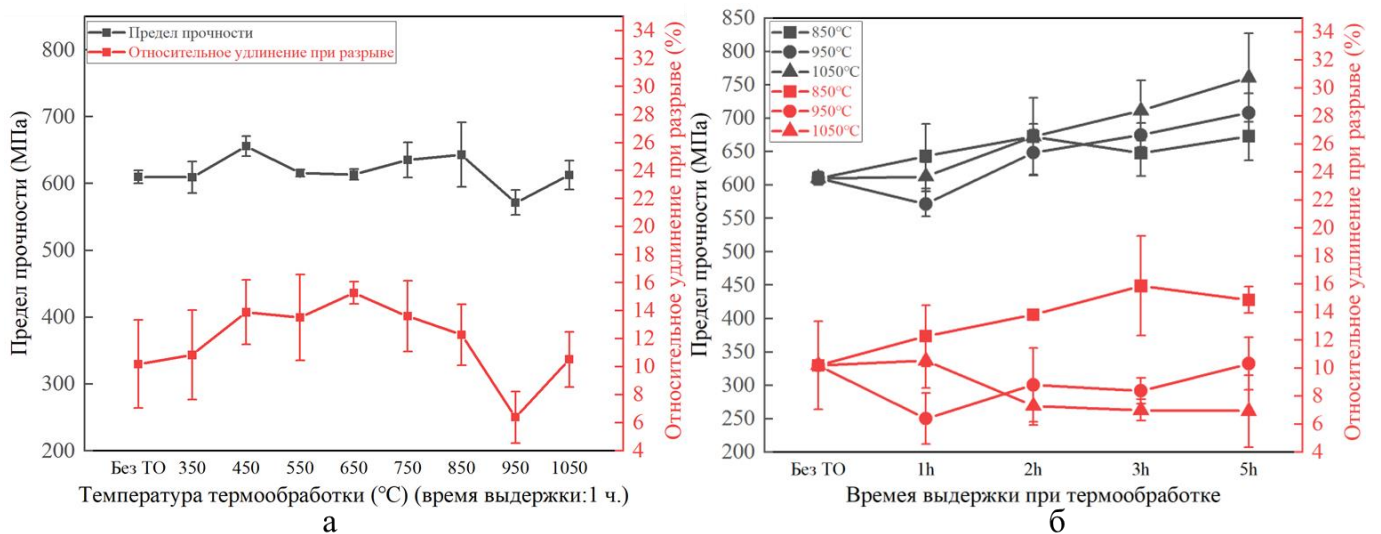


Рисунок 9 – Изменение механических свойств при различных температурах термообработки (а), и времени выдержки (б)

Образцы четко разделяются на 3 основных группы. Для термической обработки до 850 °C происходит увеличение пластичности материала без увеличения прочности. Причем при увеличении длительности выдержки при отжиге пластичность возрастает. Это связано со значительным снижением доли β -фазы и увеличением доли пластичной α -фазы. При этом снижение размера пластинок приводит также к небольшому увеличению предела прочности в сравнении с напечатанным образцом. При выдержке в условиях выше температуры полиморфного превращения происходит формирование структуры с высокой долей β -фазы, что приводит к формированию менее пластичных, но более прочных образцов. Наибольшая прочность достигается при длительной выдержке в условиях температуры 1050 °C. Увеличение времени выдержки материала приводит в данном случае к росту предела прочности материала.

Разрушение образцов, полученных электронно-лучевым сплавлением и термообработанных при температурах ниже температуры фазовых превращений происходило идентичным образом с исходными образцами (рисунок 10а, 10в). Перед разрушением формировалась ярко выраженная шейка на образце со значительным сужением (рисунок 10а). Изломы при этом были представлены ямочным строением с крупными до 30 мкм ямками (рисунок 10в).

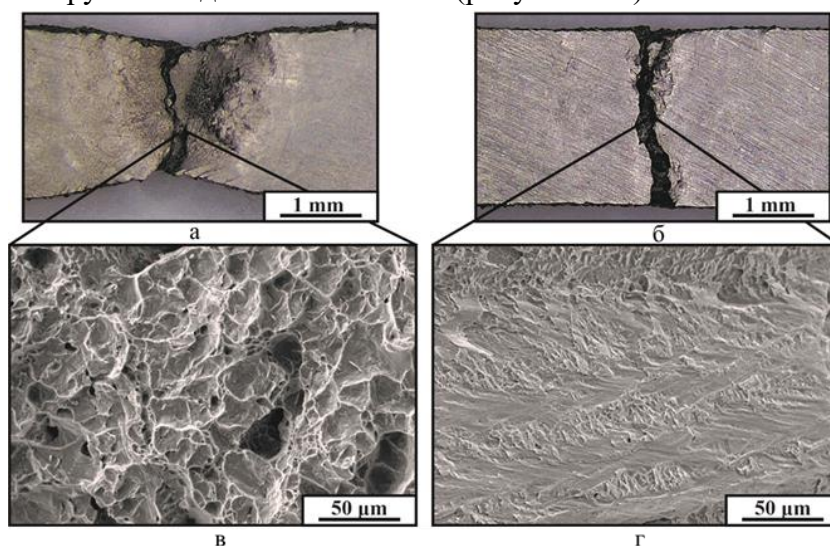


Рисунок 10 – Строение изломов образцов сплава системы Ti-Al-V после отжига в течении 3 часов при 850 °С (а, в) и отжига в течении 5 часов при 1050 °С (б, г). Внешний вид зоны разрушения после испытания (а, б) и растровая электронная микроскопия (в, г)

При испытаниях образцов, отожженных при температуре выше температуры фазовых превращений разрушение происходило практически без образования шейки в условиях значительно меньшей пластичности материала (рисунок 10б). В структуре изломов преобладало также ямочное строение, но смешанное с участками по структуре близкими к межфазному разрушению по границам пластинок α - и β -фазы (рисунок 10г). В участках с ямочным строением характерны значительно меньшие размеры ямок (менее 10 мкм), чем при разрушении образцов после печати (рисунок 10г). Такое положение связано с достаточно высокой долей β -фазы, сформировавшейся при длительном отжиге в условии температуры, превышающей температуру полиморфного превращения. На основе проведенных исследований создана база исходных данных для расчёта прочности на растяжение и удлинение при разрыве материала, сформировавшегося из проволоки ВТ6св, с целью прогнозирования его свойств после термообработки. База данных содержит исходные данные для построения кривых « σ - δ » для образцов при разных режимах термообработки (приложение А).

Ионная обработка сплава сопровождалась существенным преобразованием структуры поверхностного слоя толщиной до 5,5 мкм (рисунок 11, а, б). Во-первых, наблюдается существенное изменение средних размеров пластин α -Ti: если в исходном состоянии поперечные размеры пластин изменялись в пределах (7–8) мкм, то после облучения поперечные размеры пластин в поверхностном слое изменяются в пределах (50–70) нм. Во-вторых, облучение сплава сопровождается $\beta \rightarrow \alpha$ превращением, т.е. допревращением β -фазы титана. В-третьих, наблюдается формирование наноразмерных частиц алюминидов ванадия состава Al_3V , расположенных вдоль границ пластин α -Ti (рисунок 11, г).

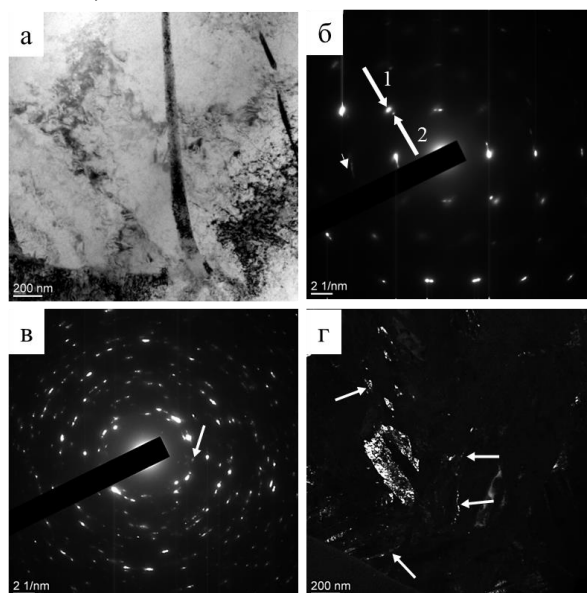


Рисунок 11 – Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава титана ВТ6св в исходном состоянии: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава титана ВТ6св в состоянии после облучения мощным ионным пучком: в – микроэлектроннограмма; г – темное поле, полученное в рефлексах $[101] \alpha\text{-Ti} + [103] Al_3V$. Стрелкой на (в) указан рефлекс, в котором получено темное поле; стрелками на (г) указаны наноразмерные выделения фазы Al_3V

В пятой главе приведены результаты по разработке технологии печати заготовки медицинского объекта «вертлужная впадина таза» на основе полученных данных. Для выполнения

печати была разработана следующая схема процесса (рисунок 12). Установка электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН была использована для получения «вертлужная впадина таза». При проектировании детали в нижней части был специально предусмотрен цилиндрический выступ, обеспечивающий более надёжное соединение изделия с опорной плитой. Цилиндрическая титановая подложка диаметром 24 мм фиксируется в трёхзахватном патроне, процесс формирования образца происходил в вакууме при давлении 10^{-3} – 10^{-2} Па, постоянный ток пучка: 27 мА, тип развёртки: эллипс, скорость печати 200 мм/мин, пауза между слоями 5 секунд, шаг между валиками на одном слое 6 мм, перекрытие валиком 1 мм. Проволока диаметром 1,6 мм из сплава ВТ6св. и предыдущий слой (при печати на первого слоя - подложка) расплавлялись электронным пучком, формируя ванну расплава. Образец формировался путем перемещения зоны печати за счет движения рабочего стола по заданной траектории. Полученное изделие представлено на рисунке 13а, после механической обработки показано на рисунке 13б.

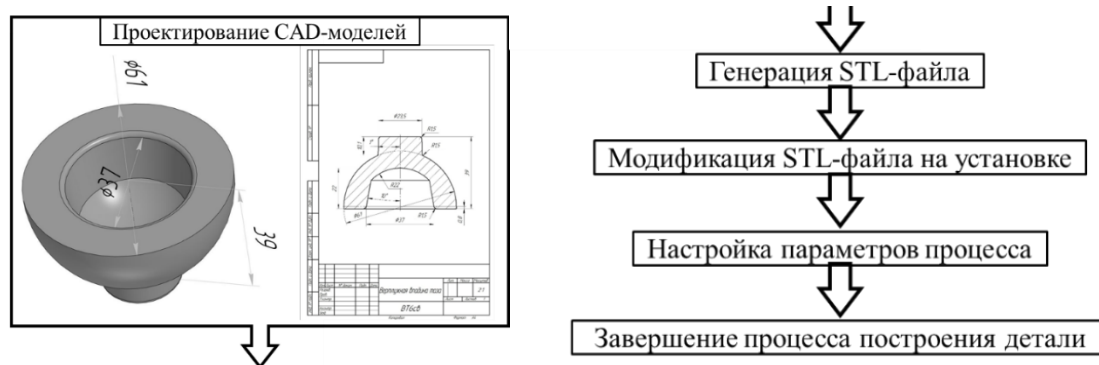


Рисунок 12 – Этапы технологии аддитивного производства



Рисунок 13 – Напечатанное изделие аддитивной технологией (а), после токарной обработки (б)

После получения напечатанного изделия был проведен испытание на растяжение, полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты измерения механических свойств

Образец	Предел прочности при растяжении, σ , МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Исходное состояние	745±24	10,2±1,2

Полученные результаты по прочности и относительному удлинению при разрыве соответствуют по требованию, данные технология по печати изделия из сварочной проволоки ВТ6св рекомендованы для освоения при производстве медицинских изделий в компании ООО «Инженер Центр».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, изложены новые научно-обоснованные закономерности

организации структуры и свойств титановых сплавов при электронно-лучевом проволоочном аддитивном производстве, установлены взаимосвязи между анизотропией структуры, механическими свойствами, деформацией и разрушением титанового сплава и определены возможности управления его структурно-фазовым состоянием после печати методами термической и пучковой обработок, которые вносят вклад в развитие аддитивных технологий с применением металлов и имеют существенное значение для их применения в практических целях.

В диссертации решены взаимосвязанные задачи и сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что воздействие электронного луча с токовыми характеристиками в диапазоне 55–40 мкА и ускоряющем напряжении до 30 кВ и скоростью перемещения порядка 400 мм/мин оплавляет сварочную проволоку диаметром 1,6 мм, кристаллизующуюся затем с высокой скоростью, и осуществляет последующий ступенчатый термический нагрев образующегося сплава системы Ti-Al-V при печати стенки. Это приводит к формированию его специфической столбчатой структуры с закалочными структурами при незначительной дефектности.

2. Проведён сравнительный анализ определяемых значений модуля упругости напечатанного сплава системы Ti-Al-V различными методами в сравнении с другими сплавами данной системы. Показано, что диапазон значений модуля находился в диапазоне 90–130 ГПа, наибольшие значения даёт ультразвуковой метод, наиболее близкие значения для всех исследуемых сплавов получены при микроиндентировании. Значение твёрдости исследуемых сплавов при сплавлении проволоки ВТ6св находилось в диапазоне 304 ± 16 МПа – 334 ± 14 МПа, что было ниже значений для сплавов типа ВТ6 и Ti6Al4V.

3. Показано, что сформировавшийся при аддитивном наращивании проволоки ВТ6св сплав системы Ti-Al-V, имеющий специфическую структуру, проявляет особенности деформации и разрушения при растяжении и сжатии. Количественные значения характеристик прочности и пластичности при растяжении находятся в диапазоне 504–612 МПа и 8–14%, соответственно, что значительно ниже показателей напечатанных сплавов ВТ6 и Ti6Al4V. При испытании на сжатие прочностные характеристики соответствуют значениям сплавам ВТ6 и Ti6Al4V. Контроль развития деформации при растяжении на различных её стадиях показал особенности локализации деформации, обусловленные неоднородностью структуры. Установлено, что исследование морфологии поверхностей разрушения при растяжении и сжатии демонстрируют пластичный межзеренный и внутрикристаллический характер разрушения.

4. Выявлено, что при рассмотрении особенностей термических влияний, в которых происходит формирование реальных крупных объектов сферической формы плавлением проволоки, практически отсутствует влияние подложки, но имеет место продолжительный нагрев объекта в процессе печати в вакууме, что в свою очередь оказывает существенное влияние температуры нагрева на структуру образующегося сплава. Макроструктура характеризуется высокой степенью неоднородности по сечению объекта. Внутри границ первичных зерен β -титана наблюдались типичные литые микроструктуры, состоящие из: зернограничного α -титана, крупных колоний пластин α/β , упорядоченных мелкодисперсных колоний α/β с «корзиночным переплетением», которые формировались внутри бывших β -зерен. Необходимость разработки термообработки для совершенствования структуры является целесообразной.

5. Показано, что увеличение длительности отжига при температуре до 850°C приводит к увеличению пластичности аддитивно-полученного сплава системы Ti-Al-V в результате повышения содержания α -фазы, а увеличение длительности отжига и температуры при 950°C–1050°C приводит к повышению предела прочности и предела текучести за счет повышения содержания β -фазы на основе формирования базы исходных данных для расчёта прочности на растяжение и относительного удлинения при разрыве сплава системы Ti-Al-V, сформировавшегося при послойном сплавлении проволоки ВТ6св и последующих термических обработок в диапазоне

температур от 350°C до 1050°C с различными временными условиями, и их анализа, предложена методика оценки оптимальных значений прочности и пластичности по данным условиям термообработки.

6. Исследованиями морфологии поверхностей изломов образцов, установлены особенности механизмов разрушения титанового сплава, зависящие от режимов термообработки и происходящих при этом фазовых превращений, заключающиеся в том, перед разрушением при температурах меньше температуры фазовых превращений формировалась ярко выраженная шейка на образце со значительным сужением. Строение изломов при этом представлено ямочным строением с крупными до 30 мкм ямками. При испытаниях образцов, отожженных при температуре выше температуры фазовых превращений разрушение происходило практически без образования шейки в условиях значительно меньшей пластичности материала.

7. Показано, что модифицирование поверхности полученного при послойной печати проволокой ВТ6св титанового сплава системы Ti-Al-V с помощью импульсного ионного пучка плотностью мощности 2 Дж/см² приводит к выглаживанию поверхности и преобразованию микроструктуры. Под действием облучения в сплаве происходит фазовое превращение $\beta \rightarrow \alpha$ и формирование наночастиц состава Al₃V по границам α -Ti-фазы. Эти структурные преобразования способствуют улучшению твердости материала: микротвердость увеличивается с 254,39 до 261,37 HV, при этом достигается более равномерное распределение значений твердости.

8. Научные и технологические результаты диссертации, касающиеся развития технологий аддитивного производства с печатью проволокой, были проверены и рекомендованы для освоения при производстве медицинских изделий в компании ООО «Инженер Центр».

Дальнейшие исследования планируется вести в следующих направлениях:

- 1) Провести испытания коррозионной стойкости напечатанных проволокой ВТ6св титановых сплавов, в том числе и после последующих обработок.
- 2) Оценить возможность целенаправленного легирования используемого сплава ВТ6св путём синтеза с проволокой легирования.
- 3) Разработка методов машинного обучения в аддитивных технологиях на основе применения баз данных о структуре и свойствах напечатанных сплавов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Клименов, В.А. Модуль упругости и твердость титанового сплава, сформировавшегося в условиях электронного лучевого сплавления при 3D-печати проволокой / В.А. Клименов, Е.А. Колубаев, **Ц. Хань**, А.В. Чумаевский, Э.С. Двилис, И.Л. Стрелкова, Е.А. Дробяз, О.Б. Яременко, А.Е. Куранов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25. – № 4. – С. 180–201. (К3)
2. **Хань, Ц.** Влияние импульсной ионно-пучковой обработки на структуру и свойства сплава, сформировавшихся при электронно-лучевой печати проволокой ВТ6св / Ц. Хань, Ч. Ли, В.А. Тарбоков, Ю.Ф. Иванов, К.В. Иванов, В.А. Клименов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2025. – Vol. 2. – Р. 27–36.

Статьи в индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

1. **Han, Z.** Influence of heat treatment modes on the structure and property of the Ti-4Al-3V titanium alloy manufactured by the wire electron beam additive technology / Z. Han, V. A. Klimenov, E. A. Kolubaev, A. V. Chumaevskii, M. Khimich // Russ Phys J. – 2025. – Vol. 68. P. 578 – 585. (K2/Q4)
2. Klimenov, V. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti-4Al-3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture / V.

Klimenov, E. Kolubaev, K. Anatoly, A. Chumaevskii, A. Ustinov, I. Strelkova, V. Rubtsov, D. Gurianov, **Z. Han**, S. Nikonov, A. Batranin, M. Khimich // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 3901. (Q2)

3. Klimenov, V. A. Influence of Anisotropy Properties and Structural Inhomogeneity on Elasticity and Fracture of Titanium Alloys Produced by Electron-Beam Melting / V. A. Klimenov, E. A. Kolubaev, **Z. Han**, A. V. Chumaevskii, A. A. Klopotov, A. M. Ustinov, Z. G. Kovalevskaya, E. Moskvichev, M. Pan // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2024. – Vol. 135. – P. 5575–5594. (Q1)

В сборниках материалов научных конференций:

1. **Хань, Ц.** Разработка оборудования и технологии электроннолучевого сплавления / **Ц. Хань**, Р. И. Юсупов, В. В. Федоров // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении : Сборник трудов XIII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи, Юрга, 07–09 апреля 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 9-11.

2. Клименов В.А. Применение методов физико-механических исследований и методов неразрушающего контроля при разработке аддитивных технологий с использованием титановых сплавов / В.А. Клименов, Е.А. Колубаев, А.А. Клопотов, А.В. Чумаевский, В.В. Рубцов, **Ц. Хань**, А.А. Батранин, И.Л. Стрелкова, М.А. Химич, С.Ю. Никонов // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения: Тез. докл. Междунар. конф. – Томск, 2022. – С. 430–431.

3. **Хань, Ц.** Исследование физико-механических свойств титанового сплава ВТ6СВ, полученного методом электронно-лучевой плавки / **Ц. Хань**, Ч. Сюй, Е. А. Даренская // Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения : Сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции, Томск, 17–21 октября 2022 года / Под редакцией С.П. Буюковой. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 107-110.

4. Клименов В. А. Особенности сплавления, структуро- и фазообразования и свойств порошковых и проволочных титановых сплавов, формирующихся в условиях аддитивных технологий / В. А. Клименов, В. В. Федоров, Р. О. Черепанов, **Хань Ц.**, Стрелкова И.Л. // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXIII Международной научно-практической конференции. В 2 частях., Новокузнецк, 23–25 ноября 2022 года. Том Часть 2. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 80–88.

5. **Хань, Ц.** Определение механических свойств титанового сплава методом инструментального индентирования / **Ц. Хань**, О. Б. Яременко, А. Е. Куранов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: Сборник докладов III Международной научно-практической конференции, Томск, 25–27 апреля 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 388-391.

6. **Хань, Ц.** Коррозионная стойкость титанового сплава, формирующегося при электронно-лучевом сплавлении проволоки ВТ6СВ / **Ц. Хань**, Г. В. Лямина, Л. Шуай // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных трудов XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–28 апреля 2023 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 232-234.

7. Клименов, В. А. Влияние анизотропии свойств и геометрической структурной неоднородности на упругие свойства и разрушение напечатанных сплавлением проволоки титановых сплавов / В. А. Клименов, Е. А. Колубаев, А. В. Чумаевский, **Ц. Хань**, В.Р. Утяганова // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: Тезисы докладов Международной конференции, Томск, 11–14 сентября 2023 года. – Томск: Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 460.

8. Klimenov, V. Up-to-date and prospect surface processing technologies of Ti alloys obtained by additive manufacturing / V. Klimenov, Zh. Kovalevskaya, V. Tarbokov, **Z. Han** // Perspective plasma technologies: Abstract book of XIVth China-Russia-Belarus symposium, Tomsk, 11–14 ноября 2023 года. – Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2023. – P. 10-11.

9. Клименов, В. А. Особенности структуры и свойств титанового сплава, формирующегося при электронно-лучевом сплавлении порошка или проволоки / В. А. Клименов, В. В. Федоров, **Ц. Хань** // Аддитивные технологии: металлы, композиты и биоматериалы: Материалы II–V Всероссийских школ и конференций, Москва, 02 октября 2019 года – 29 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", 2024. – С. 36–38.

10. Клименов, В. А. Влияние термообработки на микроструктуру изделий аддитивного производства из сплава ВТ6св / В. А. Клименов, **Ц. Хань**, Е. А. Колубаев [и др.] // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов Международной конференции, Томск, 09–12 сентября 2024 года. – Томск: без издательства, 2024. – С. 431-432.

11. Klimenov Vasily Prospective Surface Treatment Technologies for Ti Alloys Obtained by Additive Manufacturing / Vasily Klimenov, Evgeniy Kolubaev, Andrey Chumaevskii, Vladislav Tarbokov, **Zeli Han** // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024): Abstracts. – Tomsk: Academizdat Publishing, 2024. – 684 p.

12. **Хань, Ц.** Влияние термообработки на микроструктуру и механические свойства сплава ВТ6св / **Ц. Хань**, М. Ци, М. Пань // Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения: Сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции, Томск, 21–25 октября 2024 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 379-381.

Свидетельство РФ:

Свидетельство о государственной регистрации базы данных: №2025621719 2025 г. «Исходные данные для расчета прочности на растяжение и удлинения при разрыве для материала Ti4Al3V, полученного аддитивным производством» / Хань Цзэли, Клименов Василий Александрович